

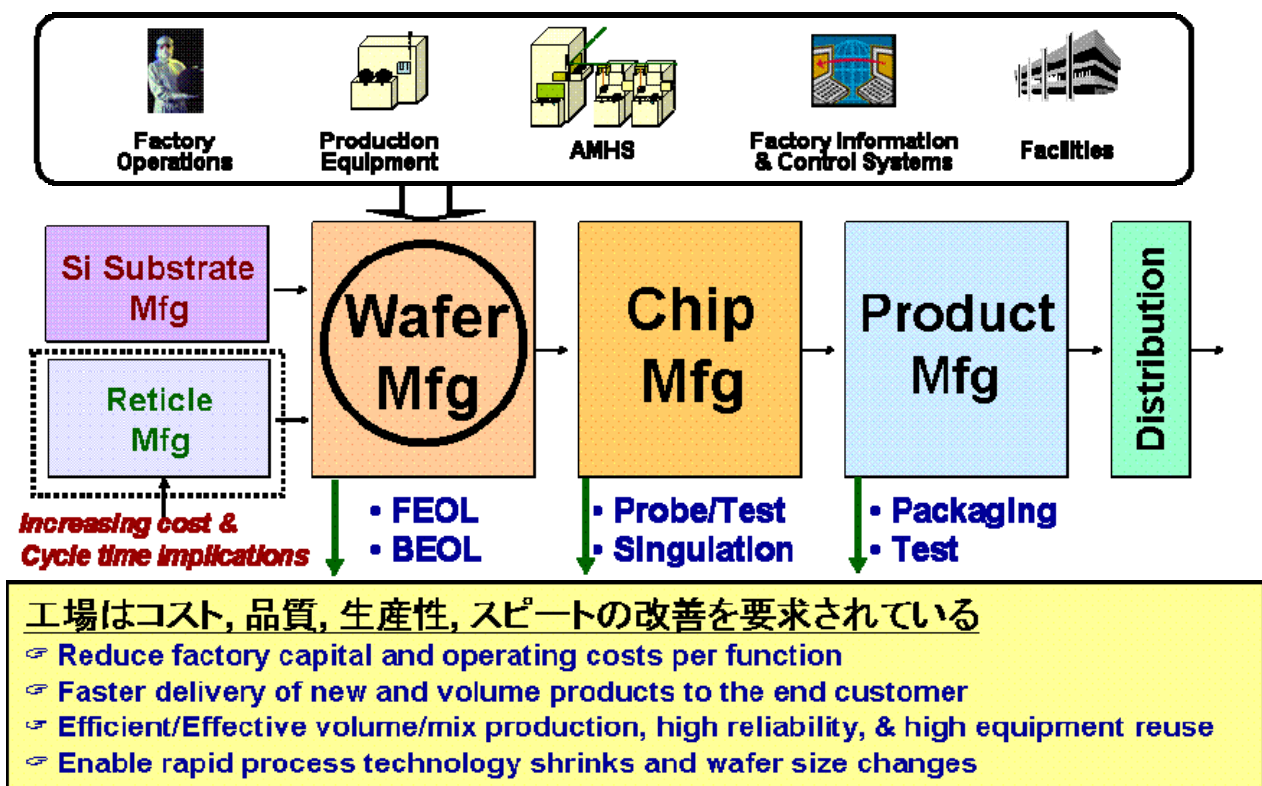
第 10 章 WG8 ファクトリ・インテグレーション

10-1 はじめに

10-1-1 活動範囲

映像や音声といった信号をデジタルな状態で処理するデジタル家電や携帯電話が台頭し、それらの信号処理を担う SoC(System on a Chip)が商品力を飛躍的に向上する存在となりつつある事から、いつしか最終製品が半導体市場を牽引する時代を迎えようとしている。

SoC はパソコンと異なり同じ様な製品を作る上においても多義にわたるアーキテクチャが使われ、しかも一般的に製品寿命が短く、過去のデータ蓄積が少ないために十分なチューニングや統計手法の適用ができない事から歩留り解析やラインシミュレータなどは精度悪化を招いている。これらの事から SoC に製品の主軸を移行してきた日本のデバイスメーカーでは SoC 生産に適した仕組みの構築によるコスト、品質、生産性、スピードの改善が強く求められている。



図表 10-1 ファクトリインテグレーション WG の活動範囲

ファクトリインテグレーション WG の活動範囲を図表 10-1 に示す。本 WG では、これら SoC 生産における工場の生産性向上(コスト、納期、品質、省エネを含む総合的生産性向上)について検討を進めており、「Si Substrate」マニファクチャリングから「Wafer」、「Chip」、「Product」、「Distribution」へつながる一連の製造工程において FEOL(Front End Of the Line)、BEOL(Back End Of the Line)に代表される「Wafer」マニファクチャリングのエリアにフォーカスして活動を行なっている。

10-1-2 ファクトリインテグレーションスコープ

本 WG は工場をいかに有効活用するか技術検討を実施しており、そのスコープを図表 10-2 に示す。SoC 生産においては製造工程の複雑化や、微細化に伴うプロセスマージンの減少によるばらつき問題に加えて、製品寿命が短く、仕様や需要が短期間で変動するため、多種の製品を少数枚ロットで流す高混流小ロ

ット生産となり、装置の有効稼働率 OEE(Overall Equipment Effectiveness)の向上による生産性向上を初め、装置の基本性能の向上によりロット流動の乱れを最小限にする事が求められる。加えて段取り替え頻度の増加により装置固有のオーバーヘッド時間が顕在化してくる中でのサイクルタイム悪化を防ぐ対策の検討を装置メーカーの協力のもと取り組んでゆく必要がある。

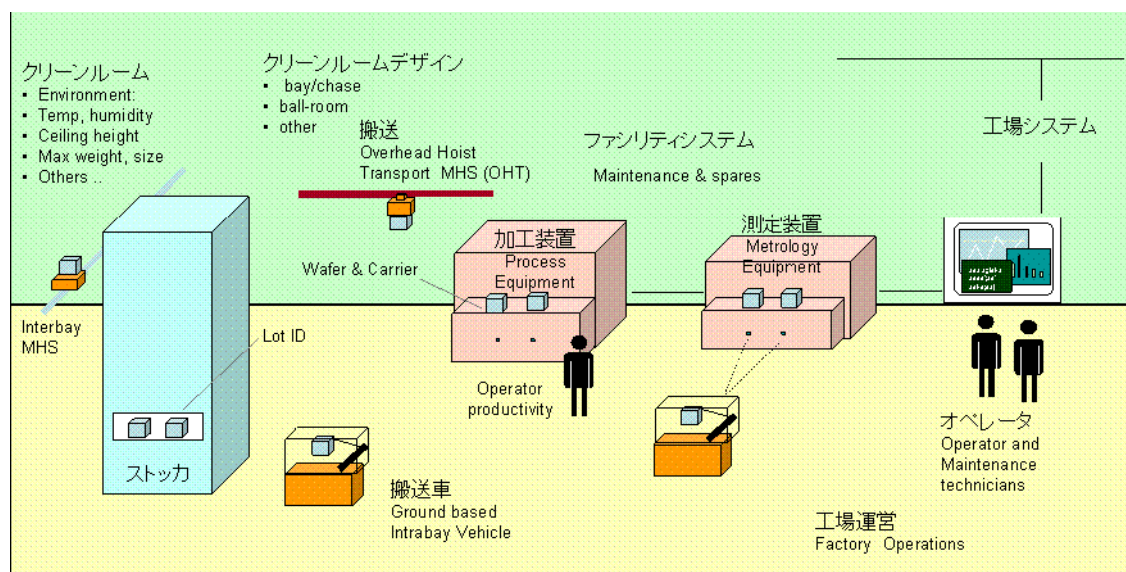
また測定においては小ロット化による測定頻度の増加に対し、いかに設備投資を抑制しながら品質保障してゆくかの課題に取り組む必要がある。

ウェーハ流動を制御する搬送器とストックにおいては、キャリア内に装填されるウェーハ数量の減少低下に伴う搬送頻度増大に対し、搬送能力を確保する施策を検討すると共にウェーハ搬送における予測制御への取り組みが求められる。

SoC 生産における課題として装置の空き・オペレータ待ちの発生や、定義されたサイクルタイム通りの作業、ロット優先度の遵守、導線影響の軽減、流動調整などが挙げられ、不要な待ち時間の発生と指示通りに生産することの困難さが浮き彫りとなる。加えて、今後更に増加するものと予測されるロット優先度の変動、複雑さに対しても、十分に能力を発揮できるフレキシブルな生産方式による製造体制を構築することが求められる。

生産システムにおいては装置の詳細データを活用する事によるプロセス制御の効率化、段取り替えの短縮に取り組み、ウェーハの待ちを最小限にするためのスケジューリングを実現してゆくことが求められる。加えて装置の監視能力の向上によりプロセスマージンの拡大、エネルギー消費の削減のための制御技術を併設することが可能となる。

これら工場内の多義に渡る技術課題に対し、「工場運営 FO: Factory Operation」「製造装置 PE: Production Equipment」「ファシリティ」「搬送 AMHS: Automated Material Handling System」「生産システム」のサブワークを構成し活動を行なっている。



工場運営(FO) 製造装置(PE) ファシリティ

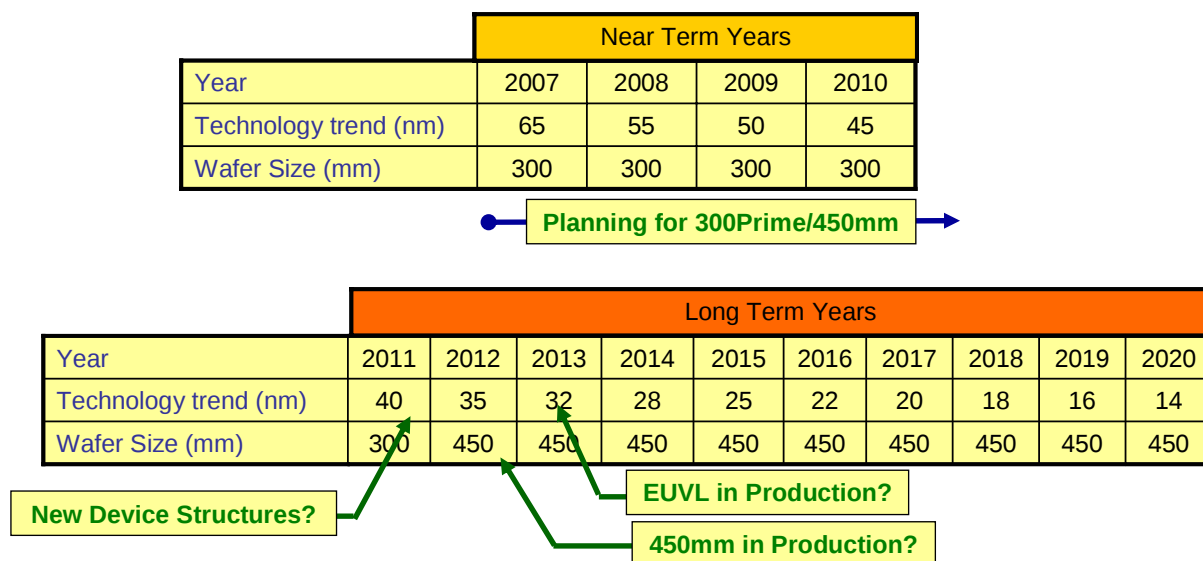
搬送(AMHS) 生産システム

図表 10-2 ファクトリインテグレーション製造技術のスコープ

10-2 ファクトリインテグレーション WG スキーム

10-2-1 工場デザインへのインパクト

今後のキーテクノロジーとして EUVL(EUV Litho)や 450mm ウェーハ、新しいデバイス構造などが図表 10-3 に載せられている。しかし、それらの工場へのインパクトは限定的なものになると考えている。当面は、微細化とビジネスの多様性がもたらす工場の生産形態の多様化が、工場デザインへのインパクトが大きいと考えられる。微細化や多品種化は、工場運営の工数、特にエンジニアリング工数の増大を招いている。如何にエンジニアリング効率を改善し、品質・コスト・納期の改善スピードを革新することがファクトリインテグレーションの主課題である。また、これが工場デザインを考える上で重要因子となる。



図表 10-3 キーテクノロジーと工場デザインへのインパクト

10-2-2 製造技術のパラダイムシフト

日本の半導体メーカの多くが進めている SoC 事業拡大にとって、設計から生産を如何に効率よく統合するかが主要課題になっている。その背景には、微細化・高集積化による LSI 開発負担の増大、マスクコストや製造コストの増大、信頼性・歩留保障の負荷増大といった技術的背景がある。さらに、顧客からマスクメーカ、装置メーカなどを含めた業務分担の多様化が重要な要素になっている。

またこのような状況下での問題点としては以下のようなものが上げられる。微細化が進む中での製品の立ち上げにおいて所望の性能(品質・歩留)を短期間で達成できない、品質確認によるロスが多い、稼動が安定しないなどエンジニアリング工数が掛かる問題が多くなっている。ますます、品質管理の局面での設計/製造間の連携が重要になっている。また、微細化の進展により、バラツキの低減が主要課題になってきている。そのためには、これまでのロット単位の品質管理からウェーハ単位での品質管理と制御が必要である。その上で装置制御をより詳細なデータに基づいて行う必要があり、構造化された装置情報、装置モデルに基づいた装置管理が重要になる。これらのエンジニアリング課題を統合し、業界を挙げて解決していくことが求められている。

一方で、SoC 事業は、顧客の多様な要求に对应していかなければならない。それは、同時に、対応すべき品種が多彩となるが故に、一つの品種の絶対数量が限定的なものにならざるを得ない。このため、SoC 製品は多品種、小ロットサイズとなる。さらに、個々の半導体の製品寿命が短くなり、平均売価も低下してくことから、1 品種当たりの生涯売り上げは減少することとなる。このことは、SoC 製品として、製品の変化(プロセス・品種・量)への対応が必要であり、同時に、ラインの製造能力バランスへのインパクトが大きくなり、ラインの変

更・維持工数の増加と段取りロスの増大を招く要因ともなる。

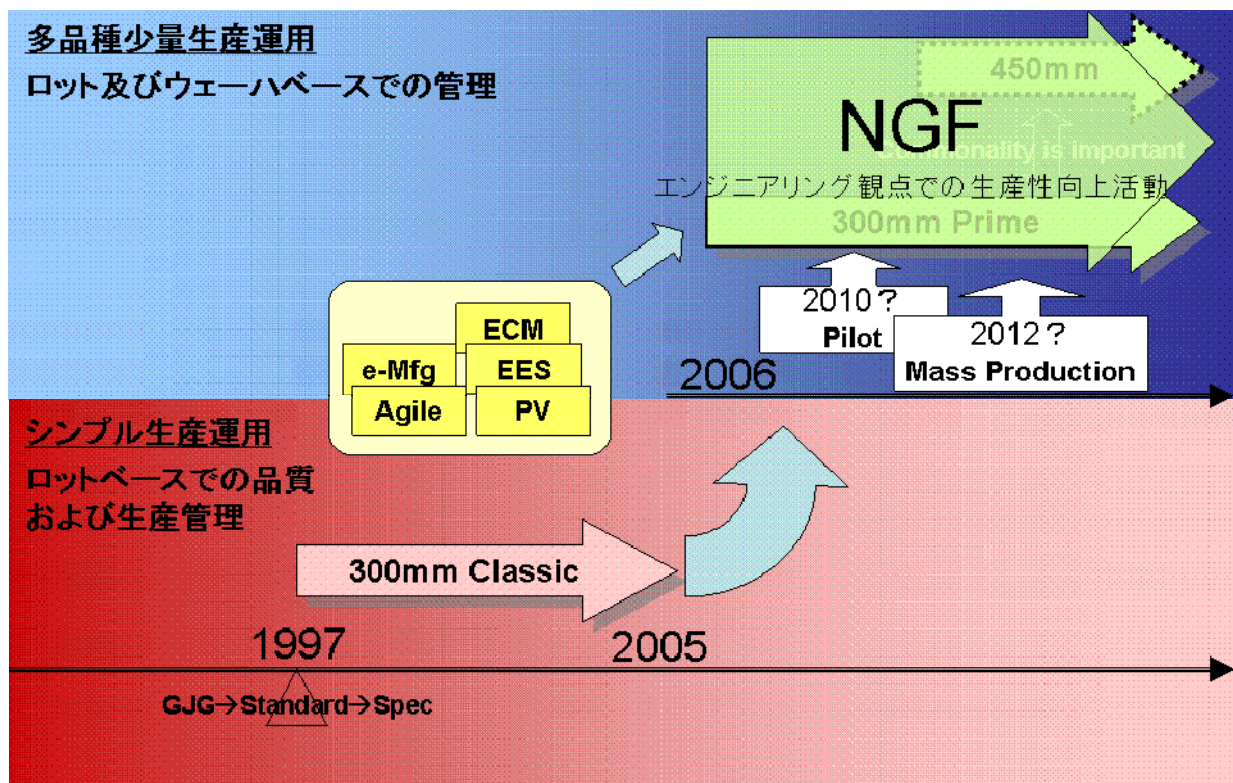
生産ラインとしては、このような状況にあっても、生産コストを減少させ、販売・設計との連携を強化して、商売になる製品の量を増やさなければならない。それには、生産から設計の総合効率を向上させることが益々望まれている。以上をまとめると下記ようになる。

- 微細化によるプロセスマージンの縮小
 - 設計/製造間での品質管理の連携
 - ウェーハ単位での品質管理と制御
 - 構造化されたモデルによる装置管理
- 多品種化による生産効率の低下
 - 販売・設計と生産連携の強化
 - 高混流生産における生産制御
 - 変動対応力の強化

このような状況下で半導体製造技術に対するパラダイムシフトの動きが起きつつある。図表 10-4 には、STRJ から ITRS の場面に過去に示した工場のコンセプトとパラダイムシフトイメージを示している。

これまで e-Mfg(e-Manufacturing)、Agile-Mfg(agile-Manufacturing)、ECM(Engineering Chain Management)、EES(Equipment Engineering System)、PV(Proactive Visualization)などの多くの工場コンセプトを発表してきたが、その集大成として次世代の工場に対する大きなパラダイムシフトを表す象徴として、NGF(Next Generation Factory)を考えている。この NGF においては次世代の工場を貫く新しい概念として、STRJ の内部では「こまめ生産」(小ロットを連続して生産する)という概念も生まれ、枚葉管理と制御、階層的品質管理概念などと共に次世代のラインイメージがまとまりつつある。

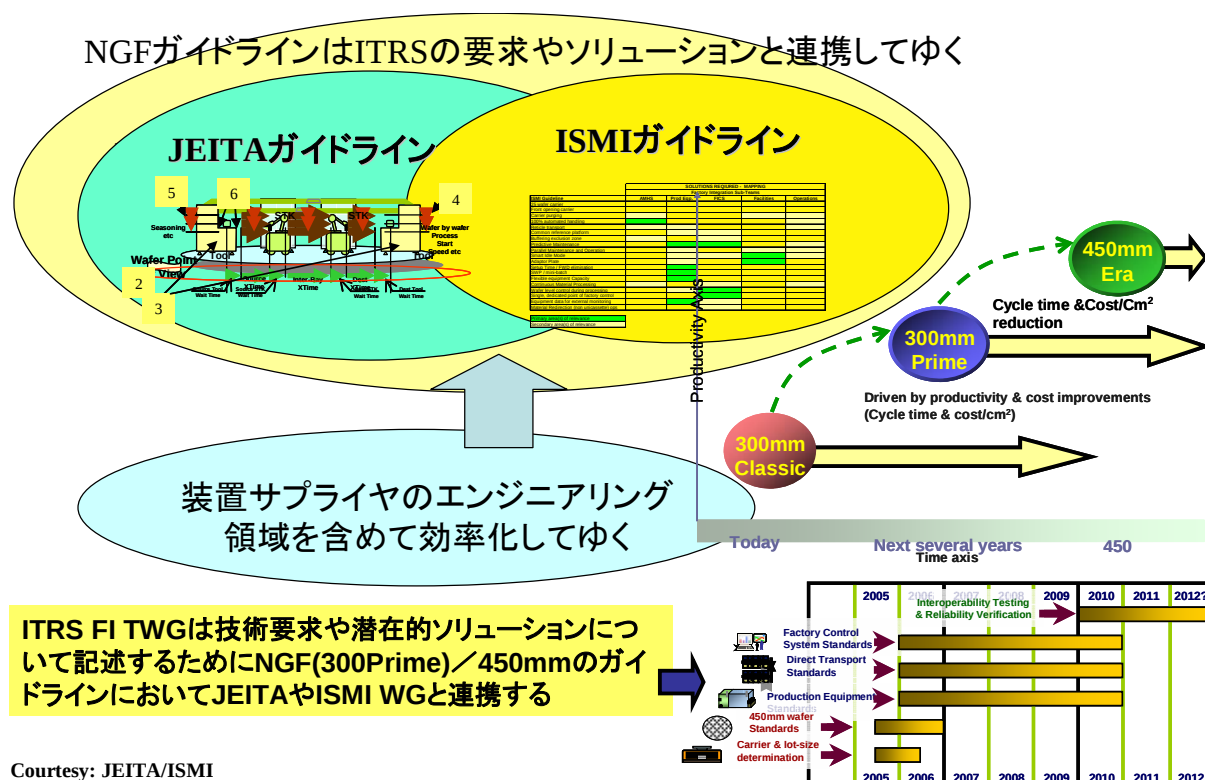
NGF 活動は、「エンジニアリング業務において IT 技術を駆使し、システム化・自動化によって生産性向上活動を革新する」ことを目的としている。



図表 10-4 次世代工場へのパラダイムシフト

10-2-3 NGF ガイドライン

NGFを進める上で、装置機能の向上は重要であり、そのため JEITA 技術委員会下に 300mm プライムタスクフォース(2008 年度からは、JNGF に名称を変更予定)が結成され、ガイドラインを作成している。一方、米国の製造関係のコンソーシアムである ISMI(International Semiconductor Manufacturing Initiative)もガイドラインを出している。これら 2 つのガイドラインには、共通する内容や関連する内容も多い。図表 10-5 には、今後の NGF ガイドラインの業界での検討の方向性を示している。

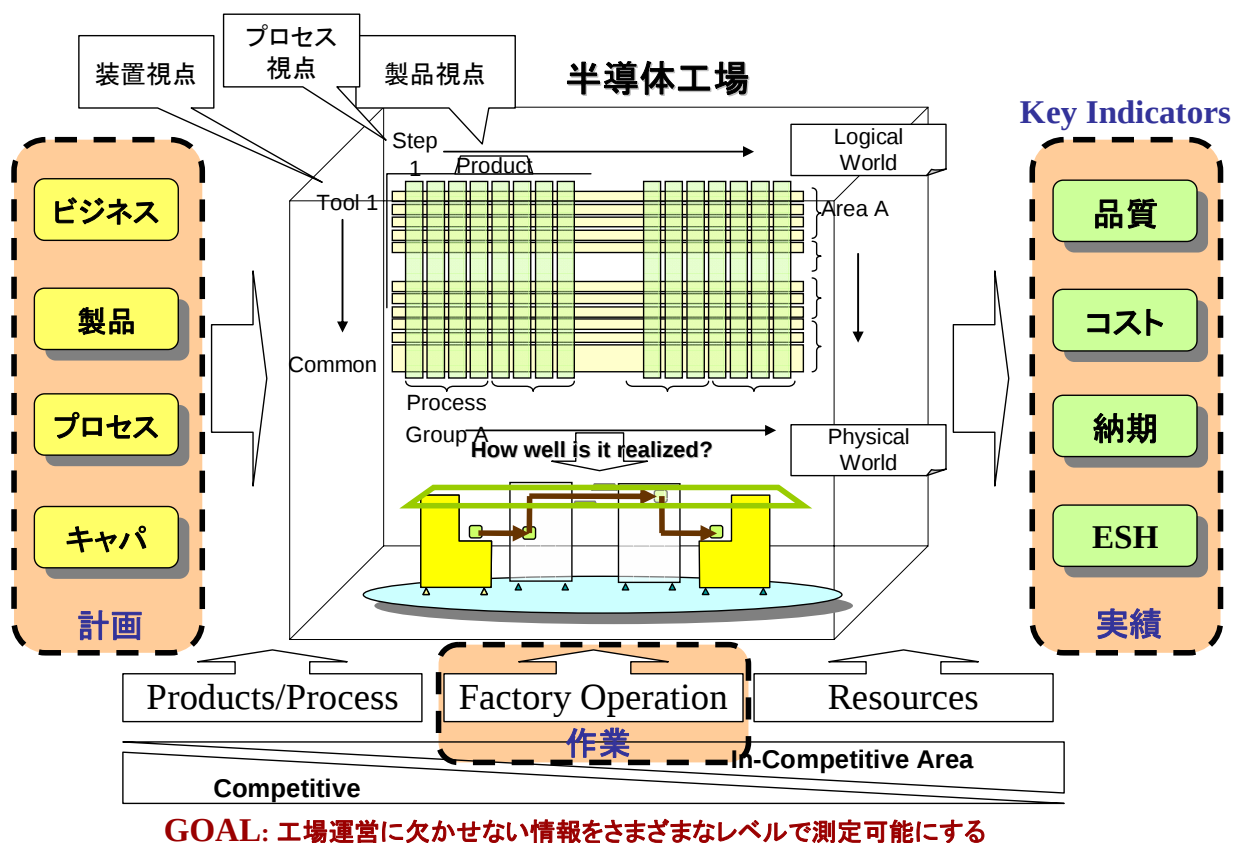


図表 10-5 NGF ガイドラインの方向性

JEITA と ISMI のガイドラインを ITRS の場で再度分析し、技術要求や対応策を抽出し、重要なものについてはロードマップ作成の検討を 2008 年度に進めることとし、そのためにはデバイスメーカーだけでなく、装置メーカーのインプットも受ける。また、ガイドラインの研究においてはムダの低減という観点が重要になるという認識で、コンセンサスがとれている。

10-2-4 工場のムダの評価

ムダの低減のためには、ムダの分類定義が必要になる。ムダは、大きく見ると品質・コスト・納期と環境それぞれに分類される。工場のムダの評価を行うにあたっては、図表 10-6 に示すようにリソース(装置、材料、人、ファシリティ)や作業(製品作業、メンテナンス作業、品質確認作業など)、製品/プロセスなどのいろいろな観点からムダを評価することが重要であり、ビジネスからくる要求も含めて評価する必要がある。一般的なムダの定義だけではなかなか具体的な技術的課題や対策に落とし込んでロードマップ化することが難しいため、STRJ ではホットロットの管理を事例としてムダの研究を実施する計画である。ムダの低減を旗として、エンジニアリング効率を向上させる仕組みに有効な項目を ITRS のロードマップに盛り組んでいく。



図表 10-6 工場ムダの評価のイメージ

10-3 各技術分野(thrust)の課題検討

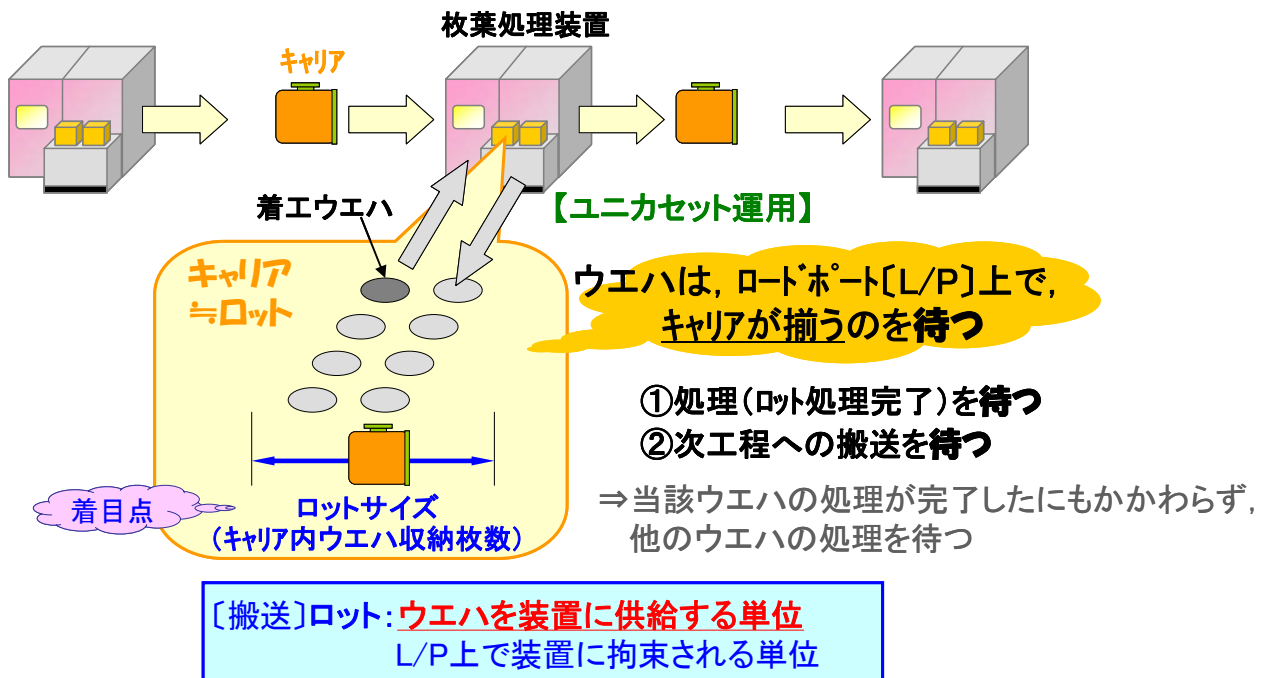
10-3-1 工場運営(FO)

10-3-1-1 SoC における課題(小ロットサイズ化の要求と課題)

前述の通り SoC 事業では顧客の多様な要求に応える為、品種が多彩、かつ製品寿命が短いため『多品種、小ロットサイズ』が求められている。また、顧客の要求である『短いサイクルタイム』実現の 1 つの手段としても、『小ロットサイズ』化が求められている。

半導体製造ラインのウェーハキャリアは、25 枚のウェーハを収納できるものが標準的に使われており、図表 10-7 に示すように、ウェーハを 1 枚ずつ処理する枚葉装置で処理の様子をウェーハ視点で見ると、キャリア内の 1 枚目のウェーハは自身の処理が終わった後、同一キャリア内の残りのウェーハ処理が終わるまでロードポート[L/P]上で装置に拘束され待たされている。このようにキャリアに依存した現行の生産方式では、個々のウェーハが他のウェーハ処理を待つ時間の問題がある。時間を短縮するひとつの方法として、ウェーハキャリアに収納されるウェーハ枚数を減らす(小ロットサイズ化)事により、他のウェーハ処理を待つ時間の短縮が可能となる。

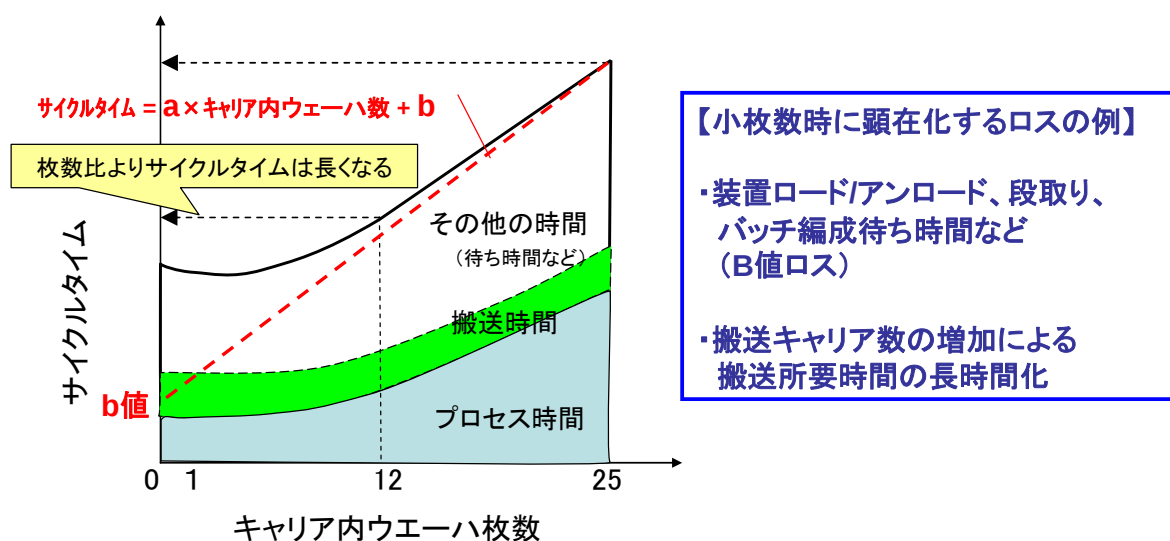
小ロットサイズ化により、半導体製造ライン内の製造サイクルタイム短縮と WIP(Work In Progress)の削減が期待できるが、小ロットサイズ時に 25 枚ウェーハ時と同じスループットを維持するためには、工程間の搬送量が増える事や、処理装置の枚数に関係なく必要となるオーバーヘッド時間に起因するロス(B 値ロス)などの問題を解決する必要がある。



図表 10-7 キャリア依存のウェーハ供給における問題点

図表 10-8 に、ロットサイズとサイクルタイムの関係イメージを示す。サイクルタイムは製造装置のプロセス時間(1 キャリアの処理に要する時間)と、処理待ち時間、キャリア搬送に要する時間などで構成されている。一般的にはロットサイズが小さくなるに従って、サイクルタイムは短くなると予想される(図表 10-8 の赤点線)が、実際には、洗浄工程や熱処理工程で存在するバッチ処理の影響や、段取り時間などに代表されるB値、AMHS の供給速度の問題など、小ロットサイズ時に顕在化するサイクルタイムの為、図表 10-8 の黒実線の様に、サイクルタイムはロットサイズに比例した短縮とはならない。

顧客の多様な要求に応える為には、製造ロットサイズは今後も小さくなっていく傾向にあるため、製造ロットサイズが小さくなることによる装置サイクルタイムの寄与分の顕在化、搬送量の増加問題を解決するための技術開発が強く望まれている。



図表 10-8 ロットサイズとサイクルタイムの関係イメージ

10-3-1-2 小ロットサイズ指標の検討

これらの事を踏まえ、これまで ITRS ロードマップではロット当たり 25 枚ウェーハにて運用される事を前提に全ての指標を決めてきたが、ロット当たり 12 枚ウェーハでの運用に対応した各々の指標を追加し 25 枚ウェーハと 12 枚ウェーハの 2 種類の指標を掲載していく事で、小ロットサイズ化の問題解決を業界に促していく必要があると考えた。小ロットサイズの指標の追加が必要な関連指標として、以下の指標について検討を行った。

	Related Metrics
FO	FO-1 Bulk lot cycle time (12W)
	FO-2 Hot lot cycle time per a mask layer
	FO-3 High-mix capacity degradation
	FO-4 Bottleneck equipment [2] [3] Utilization , Availability
	FO-5 Average number of wafers between reticle changes
PE	PE-1 New non-product wafers(NPW) as a% of wafer starts per week
	PE-2 Overall NPW activities versus production wafer activities
	PE-3 248 nm lithography scanner productivity (wafers outs per week per tool)
	PE-4 193nm lithography scanner productivity (wafers outs per week per tool)
	PE-5 Setup (new)
MH	MH-1 Peak system throughput -Interbay transport (moves/hour) -Intrabay transport (moves/hour) -high throughput bay -Transport(moves/hour)-unified system
	MH-2 Transport MMBF
	MH-3 Storage MCBF
	MH-4 Average delivery time (minutes)
	MH-5 Peak delivery time (minutes)
	MH-6 Hot lot average delivery time (minutes)
FICS	FI-1 MCS design to support peak number of AMHS transport moves (moves/hr)
	FI-2 FICS design to support peak number of AMHS transport moves (moves/hr)
Facility	なし

図表 10-9 小ロットサイズで追加の検討を行った指標

10-3-1-3 12 枚ロットでのマスキレイアあたりのサイクルタイム

STRJ は、小ロットサイズを表す指標の 1 つとして、12 枚ロットサイズ時のサイクルタイムを ITRS2007 の FO 関連指標テーブルへ加えた。12 枚ロットサイズ時のサイクルタイム値を併記する事によって、12 枚と 25 枚ロットサイズでの製造装置の能力を類推する事ができ、小ロットサイズ化によって製造装置に何らかの能力低下があるかを確認できるようになる。小ロットサイズ化によるロスでよく知られている、少数枚数ロットで装置のレシピ切り替えが発生した時に装置の処理が一時的に途切れるロスなどについても、今後小ロットサイズ時の生産性ロスを明らかにする事で、装置ロスの改善を促すことが期待出来る。またこのような装置ロスの改善は、小品種生産においても有用であると考えられる。

		06	07	08	09	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
Technology Node		70	65	57	50	45	40	35	32	28	25	22	20	18	16	14
Wafer Diameter		300	300	300	300	300	300	300	450	450	450	450	450	450	450	450
	12 Wafer Non Hot –Cycle time per mask layer		1.0	1.0	0.84	0.84	0.72	0.72	0.72	0.68	0.68	0.68	0.63	0.63	0.63	0.63
	STRJ提案															

'06	Non Hot –Cycle time per mask layer(days) –X-Factor	1.5	1.5	1.5	1.4	1.4	1.2	1.2	1.2	1.13	1.13	1.13	1.05	1.05	1.05	1.05
		3.2	3.1	3.1	3.1	3.05	3.05	3.05	3.05	3.05	3.05	3.05	3.0	3.0	3.0	3.0
	Hot Lot –Cycle time per mask layer(days) –X-Factor	0.55	0.55	0.55	0.51	0.51	0.47	0.47	0.47	0.44	0.44	0.44	0.39	0.39	0.39	0.39
		1.4	1.3	1.3	1.3	1.3	1.2	1.2	1.2	1.2	1.2	1.2	1.1	1.1	1.1	1.1
	Super Hot Lot –Cycle time per mask layer(days)	0.32	0.32	0.32	0.31	0.31	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3

図表 10-10 ITRS2007 へ追加した小ロットサイズ(12 枚/ロット)のサイクルタイム指標

10-3-2 製造装置(PE)

製造装置部会では、多品種短寿命 LSI 製品生産への対応として、サイクルタイム短縮と生産性を両立することを目的とした技術開発を促進するメッセージをロードマップのメッセージとして発信することが重要であると考えている。生産資源として最も重要なプロセス加工装置及び検査装置の生産への関わり方を可視化することは、従来からも極めて重要な生産性向上の活動の 1 つである。また装置の生産活動への関わりには省エネルギー化の観点も当然含まれるべきである。

従来からの生産資源有効利用の観点からの生産活動の可視化に加えて、生産の対象であるウェーハの観点から生産活動を可視化することが重要であり、本部会ではこれをここ数年間の活動の機軸としている。2006 年、2007 年の重要な成果として、ウェーハ観点からである事と、サイクルタイムの計測と、その計測した結果から、サイクルタイム等の改善活動の方向性を見出すことが、従来に比較して容易になることをメッセージとして業界に発信した。

サイクルタイム短縮への対応としては、製造設備が多品種生産への対応するため、俊敏性を増すことも要求される。加工対象であるウェーハ(あるいは同キャリア)を搬送する装置の俊敏性についても、従来からのリソース観点での可視化に加え、ウェーハ観点で可視化され、要求を表現することが重要であることを、2006 年の本報告書で詳述した。2007 年度版では、より工場内に WIP(生産仕掛ウェーハ)の少ない生産、あるいは、小規模の受注サイズに対して小ロット(数枚/キャリア)で行われる際に重要となる、ウェーハ 1 枚 1 枚の観点の生産性について、拡張して検討した。

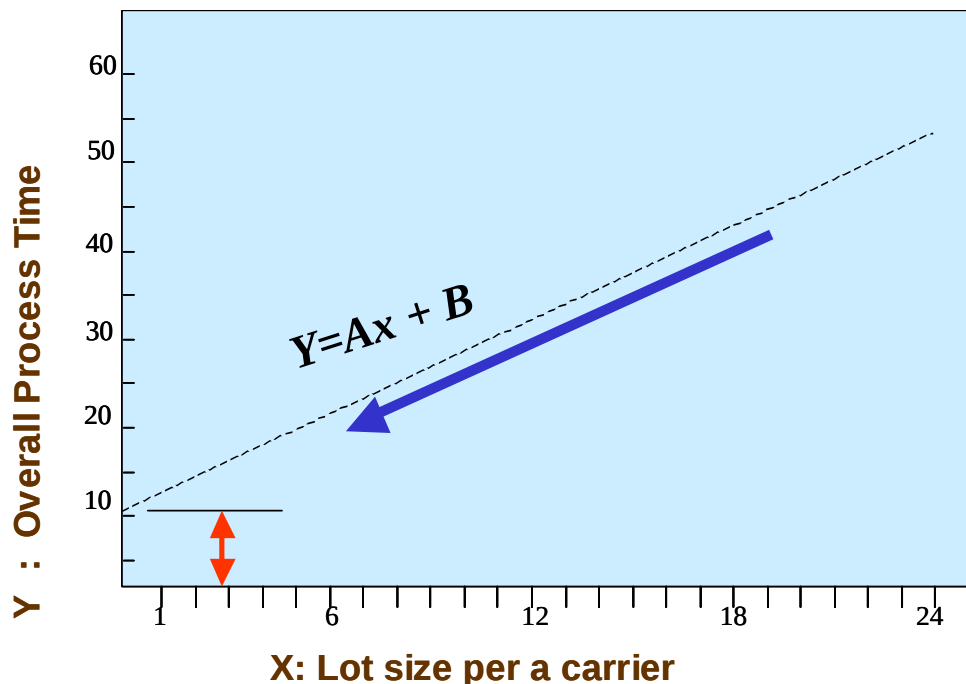
STRJ ファクトリインテグレーション WG は従来から無駄を可視化することが重要との主張を続けているが、2007 年の後半から、450mm 移行の代替として、300mm 技術工場での徹底的な無駄排除が業界要求として台頭してきた。300mm 現世代技術の生産性の再検討後での 450mm 移行は、300 プライムとして認知された考えであったが、具体的な効率向上については、デバイスメーカーからの具体的な提案が無い状態が続いた結果、STRJ の主張する無駄の可視化によるアプローチに期待が集まったと考えられる。とくに最重要な工場リソースである装置とその運用について無駄を可視化し、改善ポテンシャルを見出すことは極めて重要である。2009 年度の改定に向けた活動として、無駄の可視化をより大きなメッセージとするための活動計画を ITRS として立案中であり、本書では述べない。

10-3-2-1 ウェーハ視点での装置の見える化

＜装置の生産性と俊敏さの見える化＞

2006 年度までは装置の生産性を知るためには、装置内のプロセスのシーケンスを可視化することが重要であることを詳細に論じた。2007 年では更に、枚葉(ウェーハ 1 枚 1 枚)でのサイクルタイムについて可視化された例を取り上げ、枚葉のサイクルタイム可視化の要求事項を深耕した。

図表 10-11 は 1 台の装置について、ロットサイズ(横軸)を変えた時の、そのロットの処理に要する時間(縦軸)を示したものである。この図は現在主流な枚葉処理装置の場合であり、大略、 $Y = Ax + B$ の形の特性となることが知られている。この A 値や B 値は装置種類等によって大きく変わるのが一般である。ある製品について、全工程でこの特性を調査し、全てを足しこみ、更に搬送時間等を合算したものが、前出している図表 10-9 である。



図表 10-11 製造装置(1)

しかしながら、図表 10-11 では、当該装置での処理切り替えに伴う段取り作業が B 値に与える影響、ロットサイズへの応答が種々の理由から非線形性となること等、を表現することはできない。図表 10-12 は、あるクラスター装置のウェーハ毎の処理合計時間の実例を調査した結果を単純化し模式的に示したものである。縦軸は、処理時間合計、横軸はウェーハのインデックスである。この図では、6 枚から 12 枚/キャリアで連続的に、装置へのキャリアの供給が行われた場合のサイクルタイムの応答を示している。

図表 10-12 にあるようにウェーハ毎にサイクルタイムは大きく変動しており、その変動は周期性を持っている。このことから以下の問題点が考えられる。

- (1) 12 枚に限らず収納枚数あるいは処理するべきウェーハの枚数が異なる連続着工を実施したときのサイクルタイムの挙動は、更に複雑な挙動となる。
- (2) 上記より正確なロット処理の終了時刻予測が難しく、小ロット生産では装置に途切れることが無いようにウェーハを供給する制御が難しいものとなる。
- (3) 工程間にタクトの違いから必然的に存在する WIP の量を適正に管理することは、小ロットで且つ、ロットサイズが常に変動する場合等には、非常に難しいものとなる。

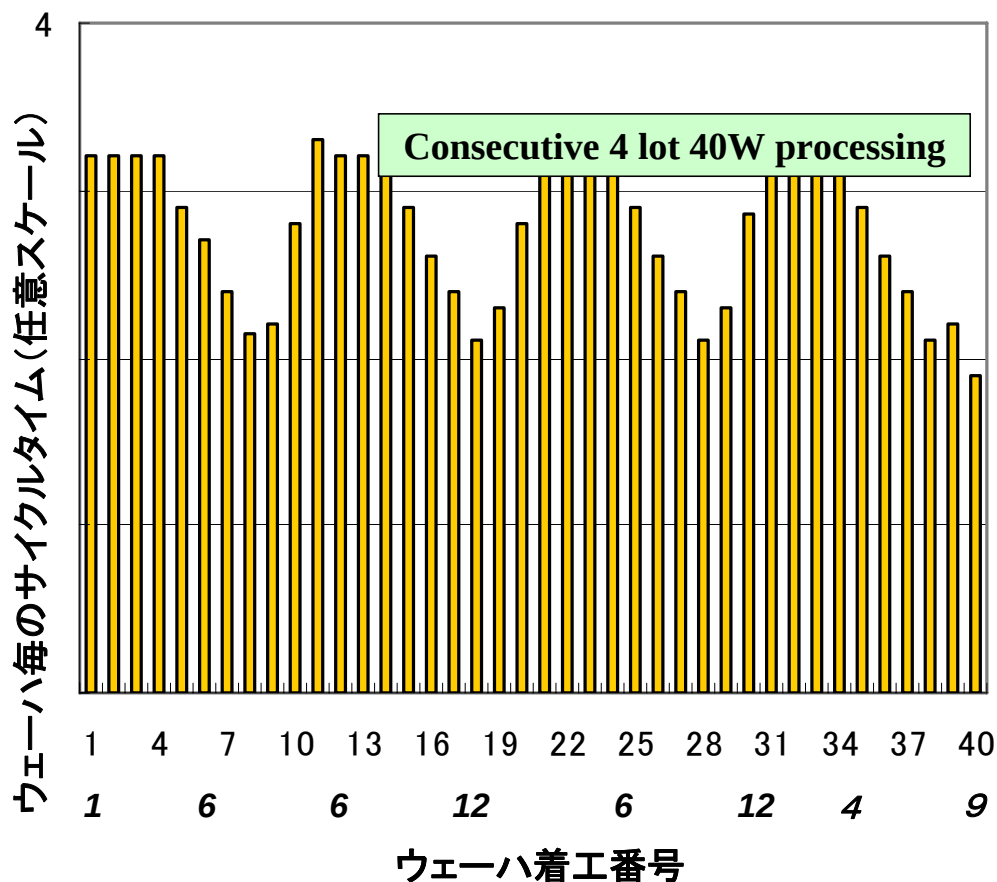
更に以下の改善ポテンシャルが考えられる。

- (1) 装置の中のウェーハハンドリング あるいは 着工制御が整流化されていないために、シーケンス上の無駄が介在している可能性がある
- (2) ウェーハのプロセス来歴に個体差が存在する可能性がある。特にユーザが定義できるレシピに記載できる範囲の外にある領域での外プロセスの時間の差が存在し、来歴に個体差が生じる可能性がある。

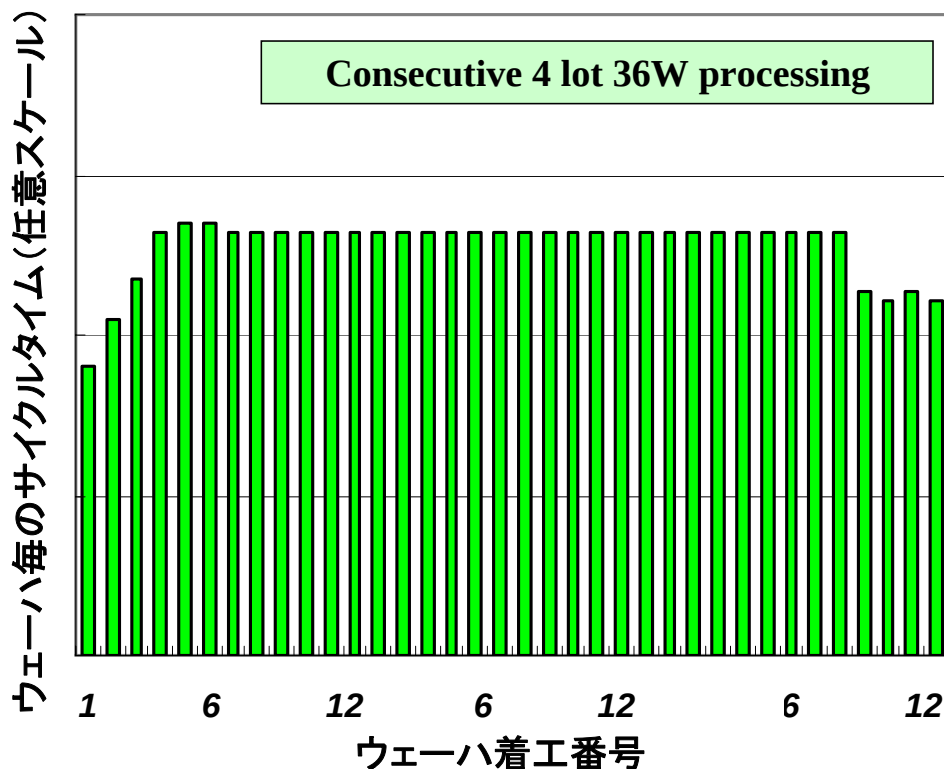
上記の例では、工場レベルで一般に対象とされるウェーハ観点の可視化に加えて、更に一段深い領域でのウェーハ観点の可視化もまた重要であることを示している。

工場レベルの製造計画を実施する階層と、上記したロットサイズや、当該装置の特性によって、生産を維持しながら、同時に WIP を過剰としないことを実現するための制御とは階層が異なる。また装置内での無駄のポテンシャルを可視化し、その無駄が顕在化しないように装置の外部あるいは装置の内部から制御することも、異なる階層である。このように異なる制御階層での制御事項と責任分担の良好な設計、それに対応した可視化が工場の生産性向上活動には極めて重要である。

ウェーハ観点の生産性評価指標は、現在十分に整備された状況ではない。現在 300mm 次世代工場のビジョン、そして 450mm 工場のビジョンが議論されているが、遅滞なく生産性可視化指標が整備され、ウェーハの観点からのサイクルタイムを節約し、且つ、生産性を高く維持した工場操業方法が新たに開発される状況が生み出されるべきである。STRJ ファクトリインテグレイション WG ではこの点を鑑みて、枚葉のダイナミックな挙動も視野に入れた評価指標が発案され、開発され、常識化し、日本のデバイスメカに利用されるべきであると考えている。



図表 10-12 製造装置(2)



図表 10-13 製造装置(3)

＜詳細な装置内部の可視化と装置生産性の改善＞

先に述べたウェーハ視点での可視化は、製造装置にウェーハから見たイベント毎の時間情報を細かく報告させる機能が必要となる。装置をウェーハが通過している間のサイクルタイムの分析、あるいはスループットの向上等、装置の基本性能に関わる性能設計とその検証、調整にはここに述べたような、詳細な装置内活動の可視化無くしては不可能である。

動作の分析や、設計の改善には、多岐に渡る分析を必要とする。設計知識と、観察に基づく知識の集積を可能にするためには、用途に対して設計された装置データとその使用方法の設計が為される必要がある。すなわち装置の能動的な可視化は、使い方を明確に設計したデータ設計が前提となるのであり、今までのデバイスメーカーが専ら利用すると考えられていた装置データ設計との際立った違いである。

図表 10-13 は、図表 10-12 と同系の装置で、運転方法が改善された場合の模式図である。装置メーカーは自ら利用できる装置データの設計を行い、実際にウェーハ毎のサイクルタイムが、ロットサイズによらないで安定に動くことのできる装置を提供することができることを示す例である。装置メーカーによる装置データの高度利用こそは、装置生産性の向上の大前提である。STRJ ファクトリインテグレーション WG では、装置生産性の改善のために装置業界と装置ユーザが能動的な可視化に適したデータとその収集結果を必要に応じて共有することによって、装置生産性向上に資することができるとの結論を得た。これは 300mm 第二世代技術に対して極めて重要な結論である。

10-3-2-2 階層的品質管理

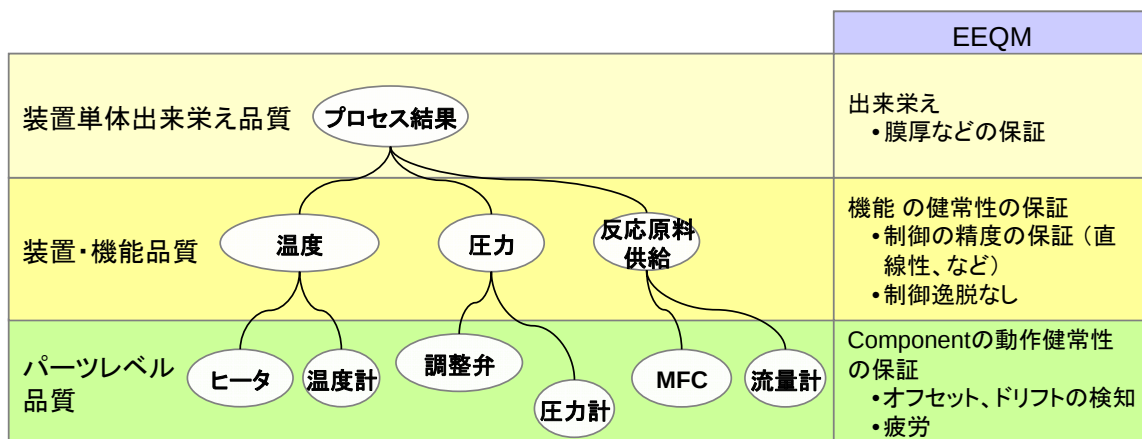
前章で、制御の階層構造について言及したが、多品種短寿命半導体製品製造に好適な製造工程での加工実施行為の品質保証適合性の改善を検討する際にも階層的なアプローチを念頭に置くことは重要である。

プロセス加工業務の実施品質をより良く管理制御するためには、装置の機能としての健全性確認作業と、醸成されたプロセス条件の健全性の確認作業とを分離することで、合理化を実現する必要がある。図表 10-14 は、階層的な工程品質保証を模式的に描いたものである。

図表 10-14 の最下層は、装置の機能毎の健全性を確認する階層であり、2 番目は、装置全体で醸成したプロセス条件(とそのシーケンス等も含んで)の健全性を確認する階層である。最上層は、その工程で実施した加工処理の結果であるか加工実施の品質、と、加工品質そのものを確認する階層である。

・ 最下層～第二層:階層的な装置加工性能の保障

- － 工場システムと装置システムで使用する製造管理情報と制御情報は、ともに高度なウェーハ観点で利用できるように設計されなければならない
- － 工場システム、装置システムは、ともにウェーハ観点の管理と制御ができるために、それぞれの情報を定義し共有化しなければならない



EEQM: Enhanced Equipment Quality Management (量産中の装置性能維持管理)

図表 10-14 製造装置(4)

＜装置層の加工実施の品質管理＞

従来から行われている装置活動の可視化には、プロセス装置がプロセス加工中の不具合発生の監視活動がある。装置が醸成するプロセス条件(多くは 熱力学的パラメータ)を、「いつもと何か異なることが発生していないか」という観点から監視することが行われてきている。この技術は FDC(Fault Detection & Classification)と呼ばれて、多くのデバイスメーカーが実施している。この監視コンテンツとモデルはデバイスメーカーの重要な差別化技術として扱われてきた経緯を持つ。この伝統的な装置監視で対象となるのは、非常に多くの場合装置不具合あるいは人間のレシピ間違えである。このため FDC の監視事項は、装置の基本的な機能、特にプロセス条件を醸成する機能の不具合の監視が主となるが、醸成されたプロセス条件パラメータも併せて監視するなど、複合した目的を持っているのが通例である。

プロセス条件を醸成する機能は、圧力を作る、反応にエネルギーを供給する、ウェーハの温度を制御する等の機能である。これらの機能の殆どは当然のことであるが、設計され装置に組み入れられているので、正常時の挙動が良く理解されている。それにも拘わらず、上述したようにそれらの監視コンテンツが秘密とするべき情報であったのは、十分でない装置情報と 装置機能に関する知識の提供を受けない状況での装置監視活動を余儀なくされていたためである。

STRJ の立場は、能動的な可視化を実現するために設計された装置データでは、十分な項目、カバー範囲、詳細度が検討されているので、装置の機能の 1 つ 1 つは、その動作健全性について監視が可能となる

べきというものである。この際、健全性を監視するために依拠する装置機能の振る舞いモデル、同モデルを利用した不具合判定機能について、共通性が高いものなどは、オープンな提供が実現されることを想定している。ただし健全性境界値(健全性判定のコンテンツ)については、装置設計の際に決定されたものを用いる必要があると考える。

重要なのは各階層で健全性を確認するモデルと そのモデルが用いる境界値が必要となる点である。例えば自動圧力調整機構(APC: Automatic Pressure Control と呼ばれている)が、その構成機能部品である、一番下の階層にある圧力計、サーボ機構、弁などの健全性の上に、二番目の階層で APC としての健全性を確認する振る舞いのモデルを使った確認を組み合わせることで、健全性の判定が可能となる。

一番上の階層では、その下までの階層の健全性が確認されているものの、更にプロセスの結果がどれだけずれ込む可能性があるかを確認する。最下層と第二層で計測されたプロセス条件から、加工品質の中央力の外れの予想を行い、品質の測定結果を待たずに品質は何らかの確度で良否判定とする、あるいは後に得られる品質測定結果とつき合わせ、良否判定を実施する。

この場合に必要となるが、工程品質判定のモデルである。最下層、第二層は対象がハードウェアで設計の対象となるものであったので、モデルがあるのが当然であったが、最上層は、プロセス条件を検討して、プロセス加工スペックにあった条件を合理的なモデルにする必要がある。また、外乱として、当該ウェーハが持つ、その前の加工プロセス結果の変動等があるので、非常に複雑である。

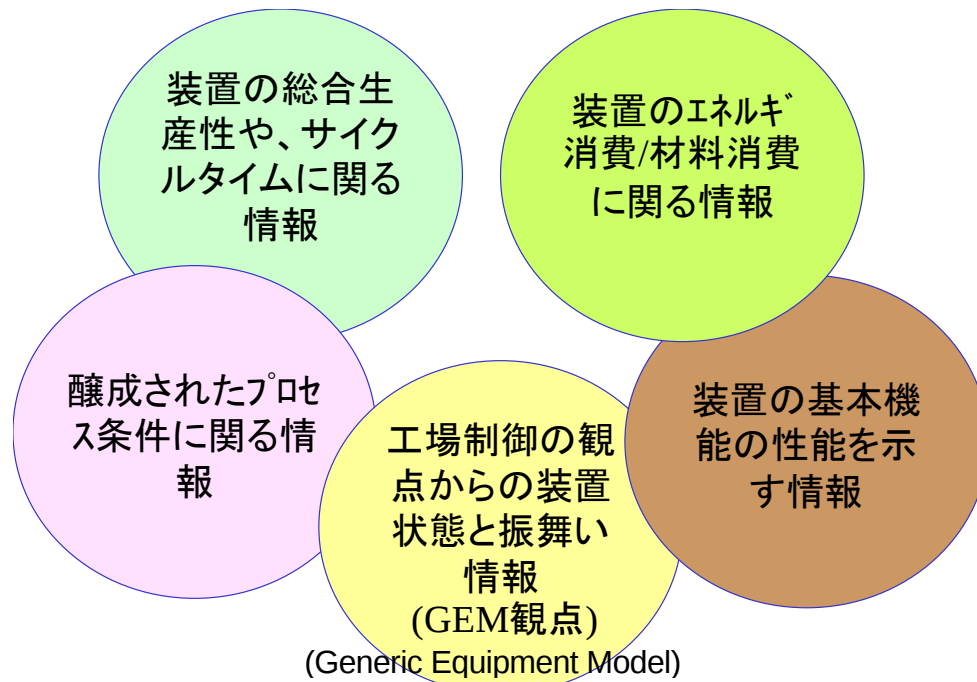
この階層では、何らかの変動が起きたから、不具合があるのかもしれない、という非健全性モデルだけでは十分な業務を果たしえない。プロセスの物理化学に依拠したモデルが必須となる。このようなモデルを併せ利用できる品質保証の仕組みが必須である。上記した STRJ での検討の結果、階層的加工品質の管理技術は従来からの、FDC の延長線上には存在しないことが明らかになった。

最下層、第二層は言うまでも無く、装置機能性能の確認作業を行う EEQA(Enhanced Equipment Quality Assurance: 装置機能の高度品質保証)を基礎とする物理的な装置の可視化が前提であり、STRJ ITRS としてはこの可視化のために必要な装置データの実装要求を掲示する。また可能な装置機能表現の標準化を要求する。最上層は、前述した意味においてデバイスメーカーの真の競争領域であり、パブリックドメインの STRJ/ITRS としてアドレスすべきは、この領域の業務が最大限に効率化されるための必須の要件として、必要なデータインフラストラクチャの整備の進展であるとの結論を得た。

<装置エンジニアリングデータの用途>

前述された、1)ウェーハ視点での装置の対策判断に有効な可視化、2)装置機能観点からの装置機能と活動の統合的な可視化は、共に新しい観点であり、重要である。その他には環境負荷の低減という社会的な要請にも対応した可視化技術の確立が必須である。STRJ ファクトリインテグレーション WG の製造装置(PE)サブチームでは、今後の装置と装置をめぐる装置エンジニアリング業務のあるべき姿について議論を行い、以下のデータを利用する領域を提案し、国際的な理解を得て、4年目にしようやく2007年版ITRSロードマップへ掲載するに至った。(図表 10-15)

- (1) 加工プロセスの進行に必要な、プロセス条件が醸成されていることを監視、管理、検定するための情報を得るためのデータ。しばしば FDC や APC(Advanced Process Control)等の制御に用いることがある。
- (2) 装置の機能とその活動を表現し、監視、管理する情報を得るためのデータ
- (3) 装置のエネルギー消費、材料消費などに関する情報を得るためのデータ
- (4) 装置の生産性、あるいはサイクルタイム等に関する情報を得るためのデータ
- (5) 装置の工場側からの制御を行うための情報を得るためのデータ



図表 10-15 製造装置(5)

＜枚葉データのインフラ整備＞

上記の5項目にはEEQAなどの新しい観点が含まれており、ロードマップとしてアドレスすべき重要な内容である。しかしながら、装置からデータが出てくるだけでは十分でない。収集したデータは業務の分担に従って直ちに利用されることが必要である。更に、責任分担の境界においては、境界を介する両パーティで互いに分担した業務内容が追跡できる必要もある。

ここまでは装置の活動を表すデータについて中心に述べたが、装置で処理されるウェーハ観点から必要となるデータについては十分には述べていない。前述した階層的品質管理の最上層業務の効率化には、このウェーハ観点の情報も併せて用いられることが必須であり、そのためのデータインフラ整備が必須である。

例えば、ウェーハを装置プロセス処理部へ引き渡す界面では、下記に示す情報が定義される必要がある；ウェーハ ID、トレーサビリティ情報：ウェーハ処理履歴(ロードポートでのカセット位置、カセット内でのウェーハ位置)、処理情報(処理予定レシピ、予定バリアブルパラメータ、予定プロセス処理チェンバ)、処理履歴情報(処理チェンバ、アーム、プロセス状態 etc.)

300mmの第一世代では、ファクトリーオートメーションの単純化のために、スロットインテグリティとキャリアインテグリティを工場と装置間の制御の大原則とした経緯であるが、今後更なる効率化のためには、これからの縛りを排除することが検討されている。すなわち、従来ウェーハの処理順番は、キャリア毎にキャリア内のスロット順番(スロットインテグリティ)を保って実施されていた(キャリアインテグリティ)。生産性向上のために、ウェーハレベルでの処理順番の変更、あるいは、出力キャリアと入力キャリアが異なる、またはオリジナルスロットと出力スロットが異なる等運用が必要になる場合もある。このような運用下では、当然の帰結としてウェーハ毎に履歴をトレースすることが必須となるが、今までの装置データ構造や、装置制御データ構造と必ずしも相性の良いデータの扱いとはならないこともあり得る。

ウェーハ毎葉の情報を効率よく交換するためには、装置活動のデータとウェーハ追跡のためのデータの両方を抱合した全体的データ構造、構造化されたデータ名前規則などの整備が不可欠である。上記に述べたように製造装置とその上位業務階層についての、総合的で、能動的な可視化を想定した体系的な議論は、業界でまだ十分になされていない。唯一 Selete(Semiconductor Leading Edge Technologies)の2002年度から

2004 年度まで行われた装置エンジニアリングシステムのシステム概念構築がこれを業界で初めて体系的に整理した活動である。

STRJ ファクトリインテグレーション WG は今後も STRJ の場、ITRS の場を利用して、上記した能動的可視化技術とその基盤となるデータの体系構造化を、半導体製造、特に日本にとって重要な少量多品種の生産での生産技術の高度化に必須の要件として取り上げ、共通技術としてドライブすることを継続して行う考えである。

10-3-3 搬送(AMHS)

小ロットサイズ化が進んでいるが、これに伴う搬送量の増大と搬送時間の短縮が課題となっている。これは搬送待ち時間が製造装置の待ち時間となり、装置の稼働率に直結するためである。

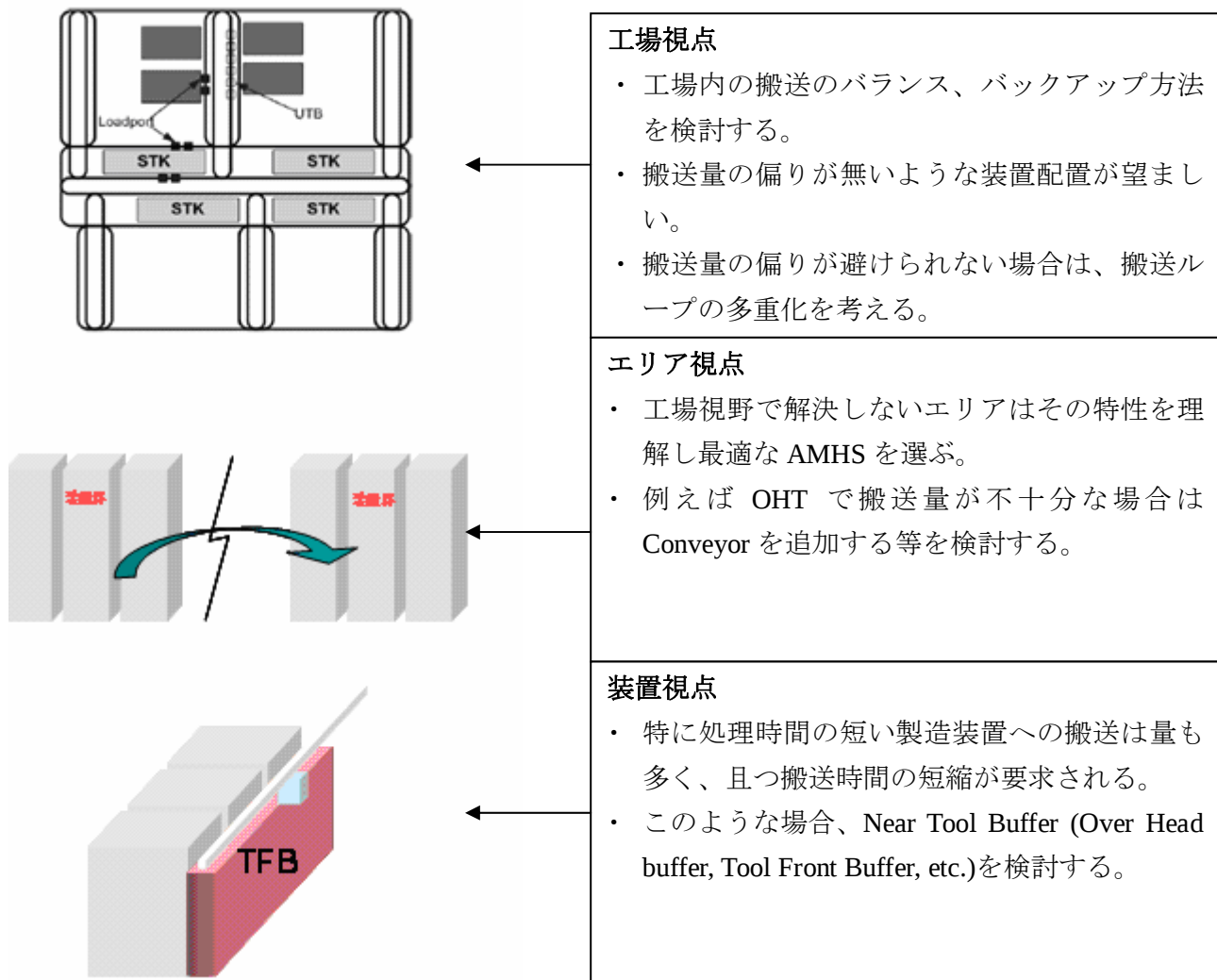
10-3-3-1 搬送能力に対する検討

従来の OHS(Over-Head Shuttle)工程間搬送と OHT(Over-Head Transport)工程内搬送の組み合わせ或いは OHT のみでの工程間内搬送では搬送量の増大と搬送時間の短縮には限界が見えて来た。このため各種の AMHS を組み合わせて解決を図ることが行われている。各種 AMHS 装置の組み合わせは対象となる工場の要求搬送量、搬送時間、スペース等の条件により決められる。

AMHS の組み合わせ例としては下記のようなものがある。

- ・複数の OHT の組み合わせ(複数軌道化)
- ・OHT + Near Tool Buffer(Over Head Buffer, Tool Front Buffer, etc)
- ・OHT + Conveyor
- ・その他の AMHS の組み合わせ

このような組み合わせを選ぶ場合、搬送を図表 10-17 のような階層的(工場視点、エリア視点、製造装置視点)に捉え、各階層での最適な搬送、AMHS の組み合わせを活用することが重要である。



図表 10-16 搬送装置の階層化

10-4 今後の課題:生産性ロスの削減

10-4-1 生産性ロスの削減

これまでの活動から、サイクルタイム削減実現のために小ロットサイズ化を進めていくと、様々な生産性ロスが顕在化することがわかった。今後は、この生産性ロスをもたらす要因に注目して、生産性ロスの削減に取り組んでいく。

10-4-2 段取りロスの削減

生産性ロスをもたらす大きな要因として「段取り」がある。段取り作業とは、装置の律速業務を補完する作業を指す。加工前準備、加工後処理や材料、間接材料の搬送作業やウェーハ認識作業、加工補足作業なども含む。必ず装置加工作業に直列的に入ってくるものや、工夫によっては、装置の律速業務の影に隠れるものなど様々である。小ロット生産では品種切り替えが多発することで、プロセス切り替えも増加することが考えられる。プロセス切り替えに際しては、装置の段取りが必要な場合があり、小ロット生産の生産性隘路事項となることが知られている。STRJ ファクトリインテグレーションWGでは2007年度の活動として、従来からは非定常的な作業として可視化されることが少なかった段取り作業についても、制御されるべき対象の作業であると位置づけて、検討を始めた。2007年度としては、段取り作業の実施責任者に従った分類、可視化の要求の検討を行った。

図表 10-17 は、段取りを上記の考えで分類したものである。

- (1) 1 次作業: 装置に完全に委譲しており、装置メーカーによって仕様化され、物理的に装置内で実施される作業。
- (2) 2 次作業: 装置と工場の界面に位置付けられる作業であり、装置側と工場側との物と情報の受け渡しを行うことがあるもの。
- (3) 3 次作業: 工場側で独立に制御する作業。

工場側、装置側双方で相互に段取り作業の低減施策が検討できるように、可視化情報と段取りの制御情報が必要である。段取り実施において装置イベントがデータとして収集される必要があり、そのためのトリガ一定義が必要である。段取り制御に関わるデータは、工場側、装置側で共有されるように整備される必要がある。段取りについての情報定義整備されることで、段取り時間の低減や段取り作業の並列化が、より積極的に検討されるようになり、装置のサイクルタイムや OEE 改善が進むことが期待できる。

分担度	個別技術の改善	制御技術の改善
1 次作業 装置内	・シーズニング、クリーニング時間短縮、 ・レシピ設定時間短縮、 ・加工単位毎 I D 確認時間短縮	・装置内ウェーハの搬送スケジューリングの最適化（装置内外処理タクトバランスの最適化）
2 次作業 装置/工場との界面	・レシピのダウンロード時間短縮 ・加工単位毎 I D 確認時間短縮 ・荷姿 I D 確認時間短縮 ・NPW 準備時間短縮	・シーズニング、クリーニングを他の処理作業と並列化する ・事前レシピ設定 ・ウェーハ処理順の最適化
3 次作業 工場	・キャリア・ディスパッチング時間短縮 ・装置安定度確認時間短縮 ・できばえ確認時間短縮	・NPW 処理ジョブ生成事前化、 ・ジョブ交換とディスパッチング調和化（搬送含む） ・できばえ確認と他の作業との並列化

図表 10-17 段取り作業による生産性低下防止対策の例

10-4-3 ファクトリレベルの生産性ロス削減に向けて

ウェーハの仕掛バランスや品種構成がダイナミックに変化する中では、ユニットレベルのロス削減とともに、ファクトリレベルの生産性ロスを見ていく必要がある。そのためには、生産性ロスを全体的に構造化し可視化する必要がある。そのうえで、制御すべき項目と実装すべき機能を明確にし、その取り組みに向けて共通なメトリックスを確立していく。

10-5 まとめ

10-5-1 12 枚/ロットにおけるサイクルタイムの指標化

国内デバイスメーカーの SoC への製造シフトに伴い、新材料・新構造・新プロセスの導入による製造工程の複雑化や、プロセスマージンの減少によるばらつきといった問題を抱えるようになっていることから、多品種化に対し制御性を向上しロット内、ウェーハ内、チップ内のばらつき低減に向けた検討が必要となってきた。

加えて SoC は、仕様が多様で、製品寿命が短く、仕様や需要が短期間で変動する事から、開発・試作品を含む多種の製品が少数枚ロットで流される高混流小ロット生産を余儀なくされている。

高混流小ロット生産に対応する上で、従来の少品種大量生産型の制御システムでは効率的な製造は望めない状況にあり、将来的にウェーハ単位での生産が必要となる可能性も視野に入れると、バラツキ問題の対

策に有効なウェーハ単位の制御方式により NPW(Non Product Wafer)に依存しない柔軟なプロセス制御が必要となる。

以上のことから、顧客要求の多様化に対応した「フレキシブルな生産」に向け、工場運営の改革と装置自身の小ロット対応の検討を進めるためにこれまでの ITRS ロードマップで利用されている 25 枚ウェーハを前提とした指標と並列で 12 枚/ロットにおけるサイクルタイムの指標化を提案し ITRS へ掲載した。

10-5-2 工場のロス削減に向けた活動

12 枚/ロットにおけるサイクルタイムは装置の段取り、バッチ編成待ち時間や、搬送キャリア数の増加によって搬送所要時間が延びるといった潜在的なロスの影響を受け 25 枚/ロットの時と比べて処理枚数に比例して短くならない。これら工場内に潜むロスをデバイスメーカ、装置メーカ、搬送メーカの総力を上げた改革によって削減する事で生産性向上を実現してゆく必要がある。

加えて、高混流小ロット化が進むと、装置のわずかな停止が与えるサイクルタイム悪化の影響が大きくなり、装置自身が高い安定性を保つ事がより強く求められてくる。サイクルタイムの短縮や省エネの必要性が高まる中でウェーハ視点での装置の振る舞いを認識するといった体系化された装置の詳細データを活用する事が重要となる。

これらの実現により装置の生産性や俊敏さに連携する見える化、エネルギーや材料消費の見える化を行う上で、装置の 2nd ポートより体系立てられた装置の詳細データを取得できるプラットフォームを備える事の必要性について今後更に検討し定義を明らかにしてゆく。

以上